



不同光质组合的 LED 灯对小白菜生长及氮代谢生理机制的研究

刘玉兵¹, 刘新华¹, 刘明月², 王军伟², 张伟春³, 曹春信¹

(1. 金华市农业科学研究院/金华市婺城区椒椒农业有限公司, 浙江金华 321000;

2. 湖南农业大学 园艺学院, 长沙 410125; 3. 金华三才种业公司, 浙江金华 321000)

摘要 以‘早熟五号’小白菜为试材, 采用 5 种光质处理, 研究不同光处理下小白菜生长、品质以及氮代谢主要相关酶活性及基因相对表达量的影响机理。与 CK 相比, 其他 4 个处理均显著提高了小白菜的株高、茎粗、地上部分鲜质量、地上部分干质量、地下部分鲜质量和地下部分干质量。所有处理中, RBP 处理下可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)含量达到最高, 亚硝酸盐含量降低。RBP 处理下硝酸还原酶(NR)活性和亚硝酸还原酶(NiR)活性最高, RB 和 RBP 处理明显增加了谷氨酸合成酶(GOGAT)活性。RB、RBG 和 RBP 处理下谷氨酰胺合成酶(Gs)活性显著高于 CK, 谷氨酸脱氢酶(GDH)活性则在 RBP 处理下最低。基因表达方面, RBP 处理下 NR、NiR、Gs 和 GDH 的 mRNA 表达水平最高, GOGAT 的 mRNA 表达量以 RB 处理最高, RBP 处理其次。结合生长量、氮代谢和相关基因表达的综合表现, 在红蓝光基础上增加紫光对小白菜的生长最为有利。

关键词 光质; 小白菜; 生长; 氮代谢; 基因表达

众所周知, 植物生长发育离不开光照, 除光强和光周期外, 光质及其组成成分也起着至关重要的作用。光质不仅影响植物种子萌发、幼苗生长、茎的生长以及根系活力, 还影响植物品质、代谢并参与调控其基因表达^[1-2]。蔬菜中的代谢物积累会受到基因型、光照条件、环境温度、灌溉和施肥的显著影响, 光质在光合生物合成和光形态建成中起着重要作用^[3]。

发光二极管(LED)光源系统是近年来逐步发展起来的新型节能照明光源, 可发出与光合色素吸收光谱相一致的单色光, 也可以根据植物对光质需求的不同, 调节光质比例, 为植物生长提供适宜的光环境参数^[4]。LED 光现已被广泛应用在各种水果、蔬菜、农作物、花卉、药用植物及部分林木植物树种幼苗的生产培育等各类植物中, 其对于植物种苗生长和品质的明显改善以及药用有效植物成分的大量累加等多个方面均可能会有着较大的不同程度的影响。然而目前的研究主要集中在

在单色红光、蓝光或不同比例的红蓝组合光。在此基础上, 本试验添加其他颜色的光质, 研究不同光质对小白菜生长量、营养品质以及氮代谢主要相关酶活性及其基因相对表达量的影响机理, 为植物工厂选择适宜小白菜生长的最佳光质配比提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用小白菜, 品种为‘早熟五号’, 采购于杭州六和种子有限公司。LED 灯光(型号: T8)订购于广东中山善栽农林科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验于 2020 年 5 月 6 日—7 月 5 日在湖南农业大学人工气候室内进行。将种子直播于 50 孔穴盘中进行育苗, 待幼苗长到 2 叶 1 心时, 选取长势一致的定植于水培槽中, 随即进行光质处理。人工气候室白天温度设定为 25 °C,

收稿日期: 2022-08-12 修回日期: 2022-11-09

基金项目: 湖南省现代农业(蔬菜)产业技术体系项目(2018NK2022); 浙江省农业(蔬菜)新品种选育重大科技专项子课题资助项目(2016C02051-8-2); 金华市重点科技计划资助项目(2020-2-012)。

第一作者: 刘玉兵, 男, 硕士研究生, 研究方向为植物栽培生理与调控。E-mail: 2977496337@qq.com

通信作者: 曹春信, 男, 高级农艺师, 研究方向为瓜菜育种与栽培技术。E-mail: caochunxin2010@163.com

夜间温度为 18 ℃,空气湿度 60%;栽培营养液采用日本园试配方,pH 保持在 6.0~6.5。在定植 30 d 后取样采收,随后立即用液氮冷冻储存于-80 ℃超低温冰箱中,以便测试相关生理指标和基因表达。

1.2.2 试验方法 试验共设置 5 种光质处理:(1)白炽光(W,对照);(2)红蓝光(RB=3:1);(3)红蓝绿光(RBG=3:1:1);(4)红蓝紫光(RBP=3:1:1);(5)红蓝近红外光(RBF=3:1:1)共 5 种不同组合光质处理;每个处理重复 3 次,共 15 个小区,每小区培养 30 株。

灯管比例按照灯珠数量之比设置,试验全程采用黑布进行遮盖,防止受到外界自然光的干扰;各处理之间也采用银黑双色薄膜间隔,避免相互影响。通过调整灯管的数量和设置水培架的高度设置光照强度为 150 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光周期为昼夜 14 h/10 h。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 形态指标测定 每个小区随机选取 3 株。用直尺直接测量小白菜叶节部位到顶部的距离作为株高;将游标卡尺测量平行于子叶展开方向的子叶节粗度作为茎粗;剪断植株根茎相连部分,用电子天平分别测量植株的地上部分鲜质量和地下部分鲜质量;设置烘箱温度为 105 ℃,杀青 30 min 后再调至 65 ℃烘干至恒量,测定植株地上部分干质量和地下部分干质量(精确到 0.01 g)。

1.3.2 叶绿素含量的测定 采用丙酮:乙醇:水=4.5:4.5:1(体积比)浸泡的方法对叶绿素进行提取,用紫外可见分光光度计检测叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素峰值,计算各叶绿素含量。

1.3.3 品质指标测定 利用蒽酮比色法原理测定可溶性糖含量。维生素 C 含量、亚硝酸盐含量、可溶性蛋白含量均使用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒测定。

1.3.4 氮含量及代谢相关酶活性测定 铵态氮和硝态氮含量测定均使用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒测定。参照上海茁彩生物科技有限公司生产的硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酸合成酶测定试剂盒、谷氨酰胺合成酶测定试剂盒和谷氨酸脱氢酶测定试剂盒的说明书测定硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性。

1.3.5 氮代谢相关酶活性基因表达测定 总

RNA 提取及 cDNA 的合成:小白菜总 RNA 提取使用 TIANGEN 公司生产的 RNAperp Pure Plant Plus Kit 植物总 RNA 提取试剂盒,操作步骤参照试剂盒的说明书,对总 RNA 进行提取,对所有被提取出来的 RNA 进行 OD 值和 RNA 浓度测定,并用电泳确认 RNA 是否已经降解。随后置于-80 ℃超低温冰箱中保存,备用。采用 TIANGEN 公司生产的 FastKing gDNA Dispelling RT SuperMix 试剂盒进行 cDNA 第一链的合成。

荧光定量 PCR:(1)引物设计试验选取了小白菜氮代谢的 5 个编码关键酶的基因进行荧光定量 PCR 分析。以 *Actin* 作为内参基因,利用引物设计软件 premier 5 设计基因特异性引物,引物由生物工程技术服务有限公司合成。内参及引物设计如表 1 所示。

(2)反应体系:采用诺唯赞生物科技有限公司生产的 2 $\times$ ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix 试剂盒进行荧光定量 PCR(表 2)。

(3)反应程序:采用 3 步法 PCR 扩增程序进行 PCR 反应:第一步,95 ℃ 30 s;第二步,95 ℃ 10 s,60 ℃ 30 s,40 个循环;第三步,95 ℃ 15 s,60 ℃ 60 s,95 ℃ 15 s。以上所有指标均生物学重复 3 次,求平均值。

表 1 实时荧光定量 RT-PCR 引物

Table 1 Nucleotide sequence of primers in quantitative RT-PCR

基因名称 Gene name	引物名称 Primer name	序列(5'→3') Sequence
ACTIN	ACTIN-F	GTCCTGTTCCAGCCTTCGTTTC
	ACYIN-R	CAAGTCCTTCCTGATATCCACGTC
NR	NR-F	ATCCAAGATTCCCCAACGG
	NR-R	GCCTCGGTGATAAACCCCTGT
NiR	NiR-F	TCCGCCATGACTTCCTCTT
	NiR-R	ACTCCGTAACACGAACACCTT
GOGAT	GOGAT-F	TCCGAACTCTAACCGAAAT
	GOGAT-R	TTGGACAACGCAATCAGC
GS	GS-F	CGGGTGAACCAATCCCTACG
	GS-R	CGACCTGGAACCTCCACTGAC
GDH	GDH-F	CAGAACATGTGTGGCTTGT
	GDH-R	AAGCACTCCAAGAAGTAAATGT

1.4 数据处理

分别使用软件 Excel 2010 和 GraphPad Prism 5 处理试验数据和作图,采用 SPSS 20.0

进行单因素显著性方差分析,用 Duncan’s 检验法对显著性差异($P<0.05$)进行多重性比较。利用 $2^{-\Delta\Delta CT}$ 计算定量相对基因表达。

2 结果与分析

2.1 不同光质对小白菜生长及叶片色素含量的影响

由表 3 可以看出,不同光质处理对小白菜生长量影响显著。与 CK 相比,RB、RBP 和 RBF 处理显著增加了小白菜的株高,茎粗以 RB 和 RBP 处理下最明显;RB、RBP、RBG 和 RBF 处理都不同程度地提高了植株的地上部分鲜质量、地下部

分鲜质量和地上部分干质量,且以 RBP 处理提高最为明显。表明 RBP 处理有利于小白菜地上部和地下部干物质的积累。

表 2 荧光定量 PCR 反应体积

Table 2 Reaction volume of fluorescent quantitative PCR

成分 Component	体积/ μ L Volume
2×ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix	10.0
Forward primer	0.5
Reverse primer	0.5
Template cDNA	2.0
ddH ₂ O to final volume	7.2

表 3 不同光质处理小白菜的生长量

Table 3 Growth of Chinese cabbage under different light quality treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	单株地上部分 鲜质量/g Aboveground fresh mass per plant	单株地下部分 鲜质量/g Underground fresh mass per plant	单株地上部分 干质量/g Aboveground dry mass per plant	单株地下部分 干质量/g Underground dry mass per plant
CK	26.53±0.26 b	5.15±0.11 b	59.37±0.79 c	1.43±0.15 e	2.57±0.10 d	0.09±0.01 d
RB	28.37±0.32 a	6.89±0.17 a	100.67±1.13 a	3.30±0.15 b	4.39±0.09 ab	0.21±0.01 ab
RBG	26.67±0.23 b	5.68±0.28 b	80.03±1.81 b	2.40±0.10 c	3.92±0.30 b	0.16±0.01 bc
RBP	28.60±0.17 a	6.51±0.17 a	99.67±3.29 a	4.30±0.06 a	4.53±0.15 a	0.25±0.03 a
RBF	29.23±0.20 a	5.48±0.18 b	82.13±4.28 b	2.03±0.03 d	3.18±0.07 c	0.12±0.01 cd

注:数值为 3 个重复的平均值±标准误。不同字母表示差异达 5%显著水平。下同。
Note:Each value is the mean ±SE of three independent experiments. Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

由表 4 可看出,除 RBG 处理外,RB、RBP 和 RBF 处理下小白菜叶绿素 a 含量明显高于 CK,其中以 RBP 处理最高,与其他处理达到显著差异;叶绿素 b 含量除 RB 处理略低于 CK 外,其余各处理都高于 CK,但各处理间差异并不显著。

RBP 处理下小白菜的叶绿素(a+b)总含量最高,RBG 处理最低;叶绿素(a/b)值在 RB 处理下最大,但各处理间未达到显著。RBP 处理下类胡萝卜素含量最高,并显著高于其他处理。

表 4 不同光质处理小白菜的叶片色素含量

Table 4 Pigment content in leaves of Chinese cabbage under different light quality treatments

处理 Treatment	叶绿素 a/(mg/g) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg/g) Chlorophyll b	叶绿素 a+b/(mg/g) Chlorophyll a+b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	类胡萝卜素/(mg/g) Carotenoids
CK	0.231±0.067 c	0.046±0.011 a	0.277±0.078 c	4.967±0.541 a	0.074±0.011 b
RB	0.237±0.026 c	0.044±0.010 a	0.280±0.036 c	5.460±0.125 a	0.080±0.010 b
RBG	0.214±0.064 c	0.047±0.021 a	0.261±0.069 c	4.513±0.126 a	0.066±0.015 b
RBP	0.489±0.013 a	0.099±0.001 a	0.587±0.014 a	4.952±0.088 a	0.109±0.100 a
RBF	0.359±0.069 b	0.068±0.016 a	0.426±0.087 b	5.319±0.126 a	0.078±0.100 b

2.2 光质对小白菜营养品质的影响

由表 5 可知,不同光质处理对小白菜的营养品质有明显不同的影响。RB、RBG、RBP 和 RBF 处理下可溶性糖含量均高于 CK,且达到显著水平,其中 RB 处理达到最高;可溶性蛋白含量以 RBP 处理最高,说明紫光有利于植株体内蛋白质的积累。此外,RB 和 RBP 处理下维生素 C 含量

均显著高于 CK 处理。与 CK 相比,只有 RBF 处理下亚硝酸盐含量高于 CK,其余各处理均表现为降低。

2.3 光质对小白菜氮代谢的影响

2.3.1 光质对小白菜铵态氮和硝态氮含量的影响 铵态氮和硝态氮是植物吸收、利用氮素的主要来源。由图 1 可知,与 CK 相比,RB、RBG、

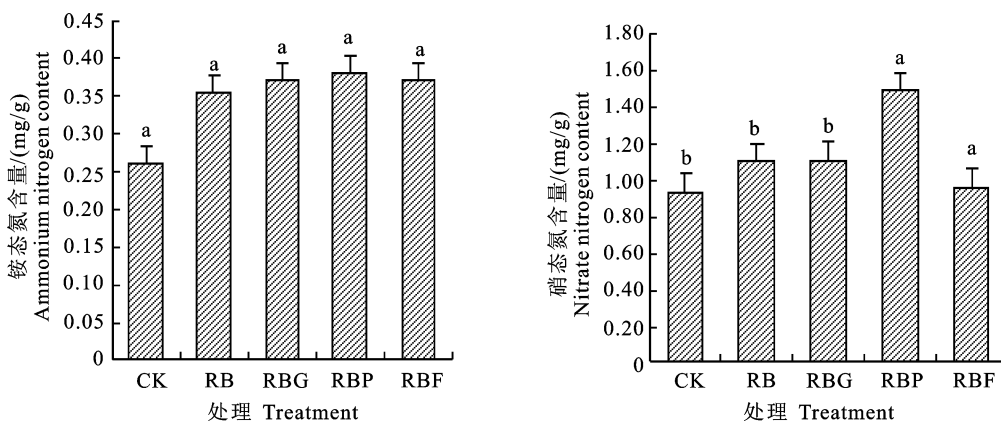
RBP 和 RBF 处理都明显地增加了小白菜叶片铵态氮含量,其中 RB 处理未与 CK 达到显著差异, RBG、RBP 和 RBF 处理则显著高于 CK;硝态氮

含量以 RBP 处理最高,并显著高于其他处理。表明 RBP 处理更有利于小白菜对氮素的吸收和利用。

表 5 不同光质处理小白菜的营养品质

Table 5 Nutritional quality of mini Chinese cabbage under different light quality treatments

处理 Treatment	可溶性糖含量/(mg/g) Soluble sugar content	可溶性蛋白含量/(mg/g) Soluble protein content	维生素 C 含量/(mg/g) Vitamin C content	亚硝酸盐含量/(μg/g) Nitrite content
CK	1.66±0.18 b	6.82±0.39 ab	1.68±0.21 bc	3.18±0.52 a
RB	2.74±0.43 a	7.25±0.72 ab	1.91±0.05 ab	2.99±0.22 a
RBG	2.36±0.12 a	6.14±0.54 b	1.77±0.12 bc	2.58±0.26 a
RBP	2.71±0.11 a	7.94±0.52 a	2.32±0.09 a	2.86±0.50 a
RBF	2.57±0.20 a	7.74±0.87 a	1.43±0.16 c	3.32±0.31 a



CK 表示对照处理;RB 表示红蓝光处理;RBG 表示红蓝绿光处理;RBP 表示红蓝紫光处理;RBF 表示红蓝近红外光处理。不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同

CK;control treatment; RB:red blue light processing; RBG:red, blue and green light processing; RBP:red blue violet light treatment; RBF:red blue near-infrared light processing. Different letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same below

图 1 不同光质处理小白菜的铵态氮和硝态氮含量

Fig. 1 Contents of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in leaves of Chinese cabbage under different light quality treatment

2.3.2 光质对小白菜氮代谢关键酶活性的影响

由图 2 可以看出,硝酸还原酶活性(NR)以 RBP 处理最高,RB、RBG、RBP 和 RBF 处理均显著提高小白菜叶片的亚硝酸还原酶活性(NiR),谷氨酸合成酶活性(GOGAT)以 RB 处理最大,RBP 处理其次,谷氨酰胺合成酶活性(Gs)除 RBF 处理与 CK 无显著差异外,其余处理都显著提高了其活性,谷氨酸脱氢酶(GDH)活性只有在 RB 处理下得到提高,其余处理均明显低于 CK,其中 RBP 和 RBF 处理更是显著降低。综上表明 RBP 处理对促进碳的同化、转化及氮的吸收与利用,增加氮代谢产物的积累的效果最佳。

2.3.3 光质对小白菜氮代谢关键酶基因表达量的影响

从图 3 可以看到,不同光质处理对小白

菜叶片氮代谢关键酶基因表达量水平的影响有着显著差异。RBP 处理下 NR 和 NiR 的 mRNA 表达水平显著高于其他处理,RB 和 RBG 处理下 NR 和 NiR 的 mRNA 表达水平虽明显上调,但与 CK 未达到显著差异;RBF 处理下 NiR 的基因表达水平更是显著低于 CK。GOGAT 的基因表达量以 RB 处理最高,其次是 RBP 处理。与 GOGAT 类似,Gs 的 mRNA 表达水平以 RB 和 RBP 处理最高,且两处理间无显著差异。RB 和 RBP 处理下 GDH 的 mRNA 表达水平显著上调,且 RBP 处理显著高于 RB 处理。表明 RBP 处理更能促进小白菜叶片 NR、NiR、Gs 和 GDH 基因表达水平的上调。

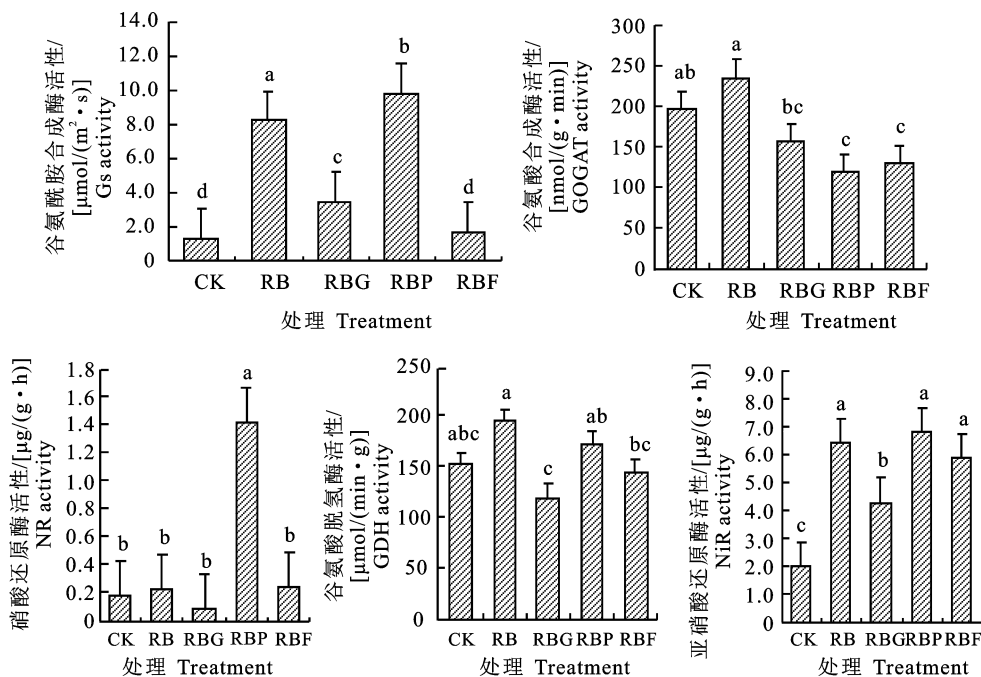


图 2 不同光质处理小白菜叶片的氮代谢相关酶活性

Fig. 2 Activities of enzymes related to nitrogen metabolism in leaves of Chinese cabbage under different light quality treatments

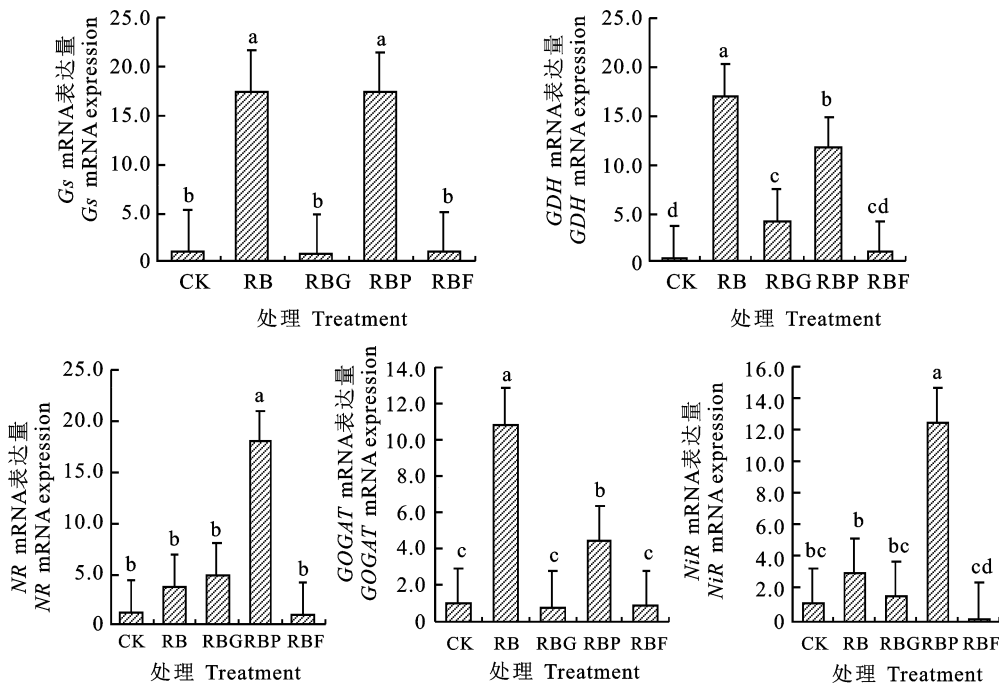


图 3 不同光质处理小白菜叶片的氮代谢关键酶基因表达量

Fig. 3 Expression of key enzymes of nitrogen metabolism in leaves of Chinese cabbage under different light quality treatments

3 讨论

生长量可以直观地表达植株生长的情况。研究表明,红光处理促进植物茎的伸长,而蓝光则促

进植物的茎粗生长^[5]。本试验中,与 CK 相比, RB、RBP 和 RBF 处理都显著增加了小白菜株高,这与高波等^[6]、孙娜等^[7]的研究报道类似。相比 RB 处理, RBP 处理下小白菜地上部分干质量、地

下部分鲜质量和地下部分干质量显著性地分别提高 3.2%、30.3% 和 19.0%。表明, RBP 处理更有利于促进小白菜的生长发育, 促进地下部分向地上部分干物质的运输和积累。

糖类物质是植物新陈代谢的主要原料和储存物质。本试验中, 与 CK 处理相比, 其他处理均显著提高了小白菜的可溶性糖含量, RB 处理提升最多, RBP 处理次之, 这与王晓晶等人在生菜上的试验结果一致^[8]。随着蓝光比例的增加, 西兰花芽苗菜维生素 C 和蛋白逐渐上升^[9], 而紫光处理也可以提高生菜^[10] 和番茄果实^[11] 的可溶性蛋白含量。本试验中, 除 RBG 处理降低外, 其余各处理均不同程度地提高了小白菜叶片可溶性蛋白含量, 其中以 RBP 和 RBF 处理最高。此外, 除 RBF 处理明显低于 CK 外, 各处理均提高了小白菜的维生素 C 含量, 其中 RB 和 RBP 处理显著高于其他处理, 分别比 CK 提高了 13.7% 和 38.1%。因此, 相比于红蓝混合光, 红蓝紫混合光更有利于促进小白菜叶片维生素 C 含量积累, 这一结论与王晓晶等^[8] 和班甜甜等^[12] 试验结果不同, 基于这种现象可能由于处理方法、光源类型及选用试材不同所导致。

在连续光处理下, 将绿光添加到红光和蓝光中对降低莴苣中的硝酸盐含量具有积极作用^[13]。本试验中, 除 RBF 处理下小白菜叶片亚硝酸盐含量要高于 CK 处理, 其余各处理均得到了降低, 其中 RBG 处理降低最多, 这与前人研究的结果一致^[14]。不同光质处理对植株光合作用的影响最终反映在对其生长和物质积累上^[15]。本试验中, 除 RBG 处理外, RB、RBP 和 RBF 处理都明显地增加了叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素(a+b) 和类胡萝卜素的含量, 这与陈艺群等^[16] 的研究结果一致。

硝酸还原酶主要作为一种能够调节各类亚硝酸盐酶的共聚性和酶的主要关键还原酶之一^[17]。研究表明, 当增加蓝光比例, 可提高莴苣和菠菜的 NR 活性, 增强氮代谢^[18-19]。本试验中, NR 活性以 RBP 处理最高, 且与其他处理达到显著差异, 与 CK 相比, RB、RBG、RBP 和 RBF 处理下 NiR 活性, 较 CK 分别提高了 224.6%、116.7%、244.8% 和 199.5%。RB 和 RBP 处理提高了叶片 GOGAT 活性。另外, 与 CK 相比, RB、RBG、RBP 和 RBF 处理都明显地提高了小白菜叶片中谷氨酰胺合成酶(Gs) 活性。GDH 活性只有 RB

处理高于 CK, RBG、RBP 和 RBF 处理分别低于对照 20.6%、40.5% 和 33.7%。这与前人表示红蓝混合光可显著提高番茄幼苗的 GS、GOGAT 活性的研究结果相似^[7]。

光可以直接参与 Gs2 基因的表达及其活性。本试验中, RBP 处理下小白菜叶片 Gs 的 mRNA 表达水平最高, 且显著高于其他处理, RB 和 RBG 处理下 NR 和 NiR 的 mRNA 表达水平与对照无显著差异, RBF 处理则显著低于 CK。Bian 等^[20] 报道了在短期连续光照下补充绿光对提高 NR 和 NiR 的 mRNA 表达水平具有积极作用。可见, 即使采用同一种光, 设置不同光照时间和不同植株, 最终结果也不相同。此外, RBG 和 RBF 处理下 Gs 的 mRNA 表达水平都低于 CK。GOGAT 的 mRNA 表达量以 RB 处理最高, RBP 处理其次, RBG 和 RBF 处理均低于 CK, 但差异不显著。在所有处理中, RBP 处理下 GDH 的 mRNA 表达水平显著高于其他处理。

4 结 论

综上, RBP 处理诱导 NR、NiR、Gs 和 GDH 的 mRNA 表达水平的上调, 提高了植株 NR、NiR、GOGAT 和 GS 活性, 增强植株光合作用, 改善小白菜的营养品质, 显著提高了地上部分鲜质量、地上部分干质量、地下部分鲜质量和地下部分干质量, 促进植株生长及同化产物向营养器官的运输和积累

参考文献 Reference:

- [1] MONOSTORI I, HEILMANN M, KOCSY G, *et al.* LED lighting - modification of growth, metabolism, yield and flour composition in wheat by spectral quality and intensity [J]. *Frontier Plant Science*, 2018(4):605-624.
- [2] 刘玉兵, 王军伟, 罗鑫辉, 等. LED 光质对芹菜生长、品质及氮代谢关键酶活性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(12):71-76.
LIU Y B, WANG J W, LUO X H, *et al.* Effect of LED light quality on the growth, quality and key enzyme activities of nitrogen metabolism of celery [J]. *Chinese Melon and Vegetable*, 2020, 33(12):71-76.
- [3] BIAN Z H. Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments [J]. *Science Food Agriculture*, 2015, 95:869-877.
- [4] SANUSI S N. Effect of light-emitting Diodes (LEDs) on the quality of fruits and vegetables during postharvest period; a review [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020 (12):1-27.

- [5] 陈祥伟. 不同光质 LED 对乌塌菜生长生理特性及营养品质的影响[D]. 山东泰安:山东农业大学,2014.
CHEN X W. Effects of different LED light on the growth and physiological characteristics and nutritional quality in Savoy[D]. Tai'an Shandong:Shandong Agricultural University,2014.
- [6] 高波,杨振超,李万青,等. 3 种不同 LED 光质对比对芹菜生长和品质的影响[J]. 西北农业学报,2015,24(12):125-132.
GAO B,YANG ZH CH,LI W Q,*et al.* Effects of three different red and blue LED light ratios on growth and quality of celery[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2015,24(12):125-132.
- [7] 孙娜,魏珉,李岩,等. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 园艺学报,2016,43(1):80-88.
SUN N,WEI M,LI Y,*et al.* Effects of light quality on carbon and nitrogen metabolism and related enzyme activities in tomato seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*,2016,43(1):80-88.
- [8] 王晓晶,陈晓丽,郭文忠,等. LED 绿光对生菜生长和品质的影响[J]. 中国农业气象,2019,40(1):25-32.
WANG X J,CHEN X L,GUO W ZH,*et al.* Effects of LED green light on growth and quality of lettuce[J]. *Chinese Journal Agricultural Meteorology*,2019,40(1):25-32.
- [9] OVAIS S. Genetic,developmental and temporal variability in nitrate accumulation and nitrate reductase activity in medicinal herb andrographis paniculata[J]. *Pedosphere*,2016,26(6):839-847.
- [10] 王丽伟,李岩,辛国风,等. 红蓝光质对番茄幼苗氮水平和代谢关键酶及基因表达的影响[J]. 园艺学报,2017,44(4):768-776.
WANG L W,LI Y,XIN G F,*et al.* Effects of red and blue light quality on nitrogen levels,activities and gene expression of key enzymes involved in nitrogen metabolic from leaves of tomato seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*,2017,44(4):768-776.
- [11] 陈文昊,徐志刚,刘晓英,等. LED 光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报,2011,31(7):1434-1440.
CHEN W H,XU ZH G,LIU X Y,*et al.* Effects of LED light source on the growth and quality of different lettuce varieties[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*,2011,31(7):1434-1440.
- [12] 班甜甜,李晓慧,马超,等. 不同光质对豌豆芽苗菜生长和品质的影响[J]. 北方园艺,2019(13):77-82.
BIAN T T,LI X H,MA CH,*et al.* Effect of light qualities on the growth and quality of *Pisum sativum* Linn. Sprouts [J]. *Northern Horticulturae*,2019(13):77-82.
- [13] BIAN Z H. Continuous light from red,blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2016,141(2):186-195.
- [14] 周成波,张旭,刘彬彬,等. 补光光质对叶用莴苣光合特性的影响[J]. 植物生理学报,2015,51(12):2255-2262.
ZHOU CH B,ZHANG X,LIU B B,*et al.* The effects of supplementary light quality on photosynthetic characteristics of lettuce[J]. *Plant Physiology Journal*,2015,51(12):2255-2262.
- [15] 刘玉兵,陈海燕,王军伟,等. LED 红蓝光质调控辣椒幼苗生长的光合机制研究[J]. 河南农业科学,2021,50(7):145-153.
LIU Y B,CHEN H Y,WANG J W,*et al.* Photosynthetic regulating mechanism of red blue LED light quality on growth of papper seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*,2021,50(7):145-153.
- [16] 陈艺群,王婷婷,马健,等. 光质对西瓜幼苗生长及光合特性的影响[J]. 中国蔬菜,2012(4):45-50.
CHEN Y Q,WANG T T,MA J,*et al.* Effects of light quality on growth and photosynthetic characteristics of watermelon seedlings[J]. *China Vegetables*,2012(4):45-50.
- [17] YUAN Z Y,DENG L L,YIN B F,*et al.* Effects of blue LED light irradiation on pigment metabolism of ethephon degreened mandarin fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*,2017,134:45-54.
- [18] 张旭. 光质对叶用莴苣与菠菜生长及生理特性的影响[D]. 山东泰安:山东农业大学,2015.
ZHANG X. Effects of light quality on growth and physiological characteristics of leaf lettuce and spinach[D]. Tai'an Shandong:Shandong Agricultural University,2015.
- [19] 滕祥勇,李彩凤,谷维,等. 甜菜谷氨酸合成酶活性与块根产量、含糖率的相关性分析[J]. 中国土壤与肥料,2012(3):65-69.
TENG X Y,LI C F,GU W,*et al.* Correlation analysis of glutamate synthase, activity with root yield and rate of sugar content in sugar beet[J]. *China Soil and Fertilizer*,2012(3):65-69.
- [20] BIAN Z H. Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2018(153):63-71.

Physiological Mechanism of LED Lights with Different Light Quality Combinations on Growth and Nitrogen Metabolism of Mini Chinese Cabbage

LIU Yubing¹, CAO Chunxin¹, LIU Mingyue², WANG Junwei²,
ZHANG Weichun³ and LIU Xinhua¹

(1. Jinhua Academy of Agricultural Sciences/Jiaojiao Agriculture Co., Ltd. in Wucheng District, Jinhua Zhejiang

321000, China; 2. School of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410125, China;

3. Jinhua Sancai Seed Industry Company, Jinhua Zhejiang 321000, China)

Abstract The effects of different light treatments on the growth, quality, as well as the activities of main related enzymes and gene expression of nitrogen metabolism involved in nitrogen metabolism were investigated. Using ‘Zaoshu No. 5’ as the test material, five different light quality treatments were applied, and compared with control (CK), the other four treatments significantly improved the various growth parameters of mini Chinese cabbage, including plant height, stem diameter, fresh mass of aboveground part, dry mass of aboveground part, fresh weight of underground part and dry weight of underground part. Among the treatments, the highest levels of soluble sugar, soluble protein, vitamin C, ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) were observed under the red, blue, and purple (RBP) treatment, with a decrease in nitrite content. Nitrate reductase (NR) activity and nitrite reductase (NiR) activity were highest under RBP treatment, while the RB and RBP treatment significantly increased glutamate synthase (GOGAT) activity. Glutamine synthase (Gs) activity was significantly higher than CK under RB, RBG and RBP treatment, while glutamate dehydrogenase (GDH) activity was the lowest under RBP treatment. In terms of gene expression, the mRNA expression levels of *NR*, *NiR*, *Gs* and *GDH* were the highest under RBP treatment, and the mRNA expression of *GOGAT* was the highest in RB treatment, followed by RBP treatment. Combined with the comprehensive performance of growth amount, nitrogen metabolism and related gene expression, adding purple light on the basis of red and blue light is most beneficial to the growth of pakchoi.

Key words Light quality; Chinese cabbage; Growth; Nitrogen metabolism; Gene expression

Received 2022-08-12

Returned 2022-11-09

Foundation item Modern Agriculture (Vegetable) Industrial Technology System Project of Hunan Province (No. 2018NK2022); Special Sub-project Funding Project of Major Science and Technology for Agricultural (Vegetable) New Variety Breeding of Zhejiang Province (No. 2016C02051-8-2); Jinhua Key Science and Technology Program (No. 2020-2-012).

First author LIU Yubing, male, master student. Research area: plant cultivation physiology and regulation. E-mail: 2977496337@qq.com

Corresponding author CAO Chunxin, male, senior agronomist. Research area: melon and vegetable breeding and cultivation. E-mail: caochunxin2010@163.com

(责任编辑: 潘学燕 Responsible editor: PAN Xueyan)